民勤青土湖梭梭茎干液流特征及其对环境因子的响应

强玉泉[1]， 徐先英[1,2]， 张锦春[2]， 刘虎俊[2]， 郭树江[2]， 段晓峰[2]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730000；2. 甘肃省治沙研究所，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 利用TDP插针式植物茎流计，对青土湖5—10月不同直径梭梭茎干液流通量（*SV*）日、季变化进行监测，结合气象数据，研究青土湖梭梭的耗水特性及其对环境因子的响应特征。结果显示：(1) 晴天，6—8月梭梭*SV*日变化曲线主要呈单峰型；7月偶有多峰型，峰值出现较早；9—10月梭梭*SV*明显降低，日变化中峰值时间推迟。雨天，梭梭*SV*呈多峰型且明显低于晴天。(2) 梭梭*SV*在5月达到最大值，6—10月梭梭*SV*呈先增后降趋势。(3) 梭梭5—10月日均耗水量2.15~5.28 kg·d^{-1}，接近古尔班通古特沙漠原生梭梭5—9月日均耗水量2.8~6.4 kg·d^{-1}。(4) 日尺度下梭梭*SV*与气象因子的相关关系依次为：净辐射>气温>饱和水汽压差>相对湿度>风速。(5) 晴天土壤水分与梭梭*SV*呈极显著相关，且在土层100 cm以下的根区是影响梭梭*SV*的主要区域。

关键词： 梭梭；气象因子；土壤水分；茎干液流；民勤

青土湖位于石羊河流域下游，20世纪60年代青土湖完全干涸，该区植被逐渐向荒漠化演变，并成为新的沙尘暴沙源地之一[1]，受干旱环境和恶劣自然条件的影响，地表风蚀沙化严重影响当地经济社会可持续发展[2]。为了改善青土湖周边的生态环境，在当地政府和居民的努力下，青土湖及周边栽植了大面积的防风固沙林，在维持沙漠生态环境、保护生物多样性，促进沙区经济发展和提高人民生活质量等方面发挥了作用[3]。但由于上游来水量有限、光照强度大使得蒸发强烈、入渗补给地下水不足等因素，沙丘和盐碱风沙土逐渐覆盖了青土湖大部分区域[4]，导致防风固沙林出现大面积衰退死亡，风沙区植被覆盖度降低，荒漠化现象加剧[5]，已严重削弱了荒漠生态系统的稳定性[6]。

植被蒸腾耗水是林地生态系统水分循环与能量平衡中一项重要分量，是反映植物水分状况的一个重要指标，也是影响区域乃至全球气候的关键因素[7]。Lagergren等[8]总结了国际上茎干液流和蒸腾量关系研究成果，认为在正常情况下植物茎干液流量能够准确反映单株植物各个时间段的蒸腾作用效率和水分利用状况。研究梭梭茎干液流变化过程对环境因子的响应关系，对深入认识梭梭的耗水规律具有重要意义。梭梭（*Haloxylon ammodendron*）是青土湖防风固沙林中的主要树种，具有耐干旱、高温及抗盐碱等特性，在防风固沙、遏制沙漠化过程中发挥着不可替代的作用[9]。迄今，在对青土湖的众多治理和研究中，风沙区植被特征[6]、地表输沙量和盐尘的分布规律[10]及白刺灌丛沙堆土壤养分[11]等研究较多，但对单株梭梭生长季耗水量及其与外界气象因子、土壤水分的响应缺乏系统研究。本研究通过对青土湖梭梭茎流量与环境因子的测定，分析了环境因子对青土湖梭梭茎流量的影响，揭示梭梭茎流量和环境因子的响应关系，对青土湖地区林区的保护与恢复和生态环境的维护有重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省民勤县青土湖，地理位置为39°08′56″~39°09′02″N、103°36′54.4″~103°38′1.21″E，

收稿日期： 2021-11-09； **修订日期：** 2022-03-16

基金项目： 国家自然科学基金(31860238)；甘肃省自然科学基金(21JR7RA733)

作者简介： 强玉泉(1994-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 1172243258@qq.com

通讯作者： 徐先英. E-mail: xyingxu@163.com

海拔高度为1292~1310 m。年平均气温为7.3 ℃,大于10 ℃的有效积温3289.1 ℃;多年平均降水量110 mm左右,主要集中在7—9月,蒸发量达2640 mm以上;无霜期168 d,日照时数3181 h,太阳辐射630 $kJ\cdot cm^{-2}$;全年盛行西北风,风力强劲,年均风速4.1 $m\cdot s^{-1}$。区域地形地貌为湖相沉积基质上相互交错分布流动、半固定、固定沙丘和丘间低地,沙丘高度3~10 m。试验地植被以旱生灌木、半灌木及一年和多年生草本为主,灌木主要有梭梭(*Halxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia arenaria*),草本主要有芦苇(*Phragmites australis*)、猪毛菜(*Kali collinum*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 试验设计

1.2.1 梭梭茎干液流及耗水量的测定　2020年4月,在青土湖梭梭林地选取长势良好、无病虫害具有代表性的梭梭样树4棵,每棵样树使用TDP插针式植物茎流计监测(表1),监测时间为2020年5月1日—10月30日。具体步骤:选取梭梭样树,使用TDP 30型号探头,将安装探头处用砂纸打磨,选择树干东侧无损伤光滑处安插茎流计探针,安装完成后固定TDP探头,将塑料泡沫用银色防辐射铝铂纸包裹,探头与CR1000数据采集器(Campbell Scientific Inc.,USA)连接,每1 min采集1次数据。根据直径从小到大对梭梭样树进行编号为S1~S4。依据Granier[12]相关联经验公式进行本试验树干液流通量密度(简称树干液流通量)的计算:

$$F_d = \alpha k^{\beta} = 119.99\times10^{-6}\times[(\Delta T_{max} - \Delta T)/\Delta T]\times1.231 \quad (1)$$

式中:F_d为液流通量密度($cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$);$\Delta T_{max}$为无茎流时两探针之间最大温差(℃),无茎流测定时间设置分别为:5月、7月、8月、9月、10月0:00—1:00,6月3:00—4:00;ΔT为有茎流时两探针间温差(℃);k无量纲单位;α和β依赖于热量系数。

单株日蒸腾量的计算公式为:

$$Q = F_d\times A_s\times T \quad (2)$$

式中:Q为日蒸腾量(cm^3);F_d为液流通量密度($cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$);$A_s$为边材面积($cm^2$);$T$为时间86400 s。

根据张晓艳等[13]在相同区域对梭梭茎流监测时,利用染色法来获取梭梭边材面积与直径相关性,得出两者之间呈现明显的指数函数关系:

$$y = 0.699e^{0.349x}(R^2 = 0.996) \quad (3)$$

式中:y为边材面积(cm^2);x为直径(cm)。

计算梭梭耗水量时,利用密度体积公式将蒸腾量Q(cm^3)转换为kg为单位的耗水量。

1.2.2 气象因子的测定　在液流监测地同步布设便携式气象站,进行气象因子监测,可以每10 min记录1次气温(T)、空气相对湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)、净辐射(Rn)、大气压(P)、风速(Ws)、降雨量(Rain)、饱和水汽压差(VPD)计算方法见文献[14-15]。

1.2.3 土壤水分的测定　在梭梭样地内挖取剖面,分别在5 cm、20 cm、50 cm、100 cm、150 cm处安装EC-5土壤水分传感器,将不同层次土壤水分传感器分别连接至EM50系列数据采集器,用ECH_2O Utility软件下载数据。监测时间为2020年4—11月,设置数据监测时间间隔为1 h。

1.2.4 数据处理与计算　采用SPSS数据处理软件进行统计分析。用Excel 2019处理2020年5—10月TDP采集数据及气象数据并进行绘图。

2 结果与分析

2.1 气象因子的动态变化

观测期(2020年5月1日—10月30日)各气象因子(T、RH、PAR、Rn、VPD、Ws、Rain)的日均值变化情况如图1所示。T先升高后降低,5月日平均气温最大温差达到12.83 ℃,温度变化大,观测期日平均

表1　梭梭样树基本参数

Tab. 1　Basic parameters of *Haloxylon ammodendron*

样树编号	株高/cm	探头型号	地径/cm	40 cm处直径/cm	探头安装高度/cm	冠幅/cm
S1	250	TDP30	5.08	4.97	40	260/190
S2	290	TDP30	5.33	5.23	40	230/280
S3	290	TDP30	5.85	5.69	40	300/290
S4	380	TDP30	7.85	7.31	40	385/370

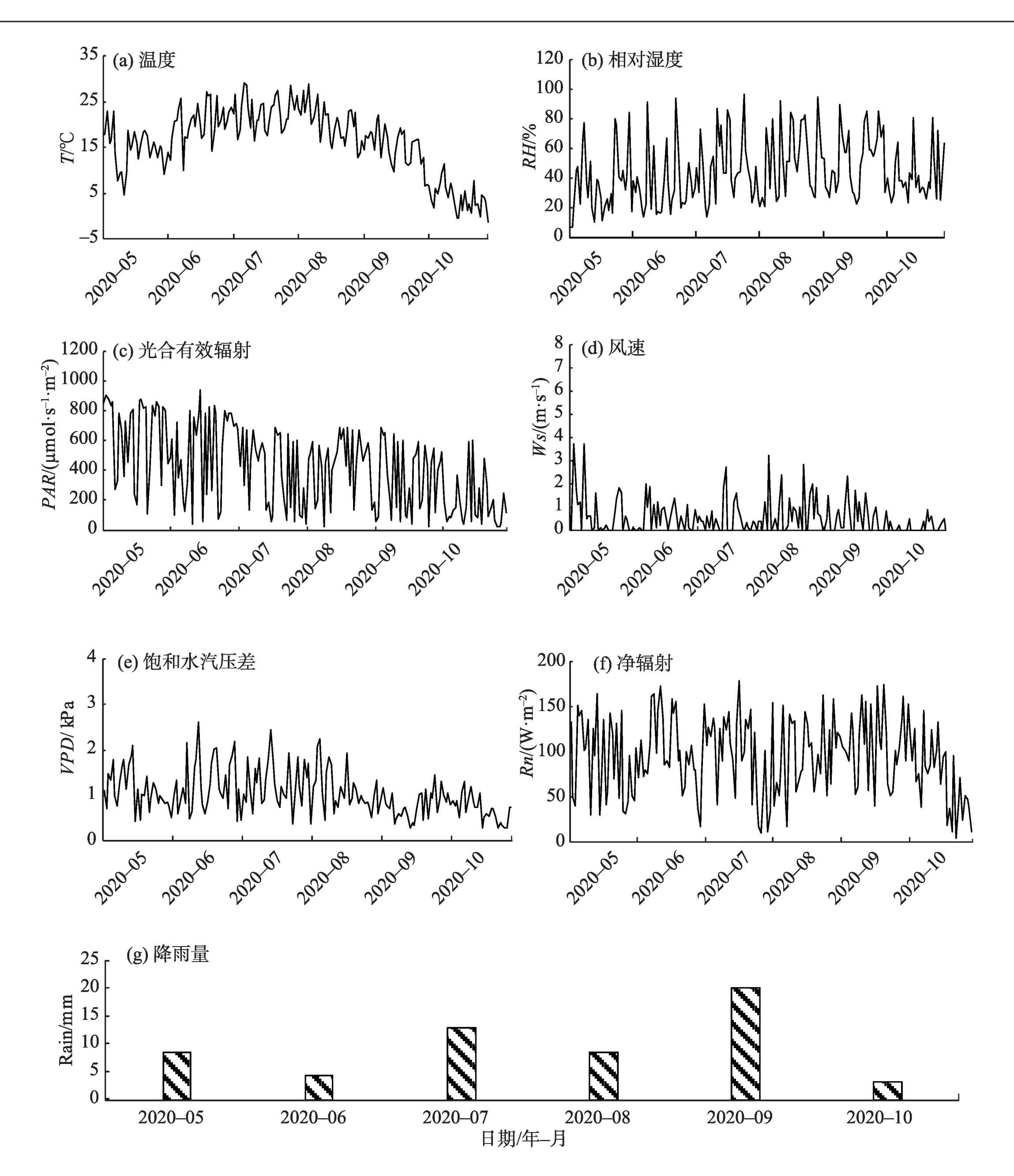


图1　气象因子的季节变化

Fig. 1　Seasonal variation of meteorological parameters

最高温在7月上旬为30.78 ℃；5—7月*RH*波动范围较大在10%~97%，8—10月波动范围减小在26%~91%；*PAR*整体趋势先升后降，峰值出现在6月中旬，为940 μmol·s^{-1}·m^{-2}；2 m处日均风速最高值在5月达到3.7 m·s^{-1}，最低值0.3 m·s^{-1}，8—9月起风较为频繁，日均风速值波动大；*VPD*先增后降，峰值出现在6月上旬为2.6 kPa；青土湖总降雨量为55.5 mm，其中，9月30日降雨量达到最高值7.1 mm；*Rn*处于上下波动状态并呈现多个峰值，分别为6月中旬172.9 W·m^{-2}，7月中旬179.2 W·m^{-2}，9月中旬175 W·m^{-2}。

2.2　梭梭茎干液流动态变化

2.2.1　梭梭茎干液流通量日变化　选取5—10月6个典型晴天（5月20日、6月14日、7月21日、8月18日、9月20日、10月19日），不同直径梭梭茎干液流通量*SV*来分析梭梭茎干液流的日变化特征（图2）。5月*SV*启动时间最晚在7:00—8:00，结束时间最早在21:40—22:20；6—10月*SV*启动时间在3:00—5:00，结束时间在0:00左右。5月、8月*SV*峰值分别在157.02~411.67 cm^3·cm^{-2}·h^{-1}和156.82~474.59 cm^3·

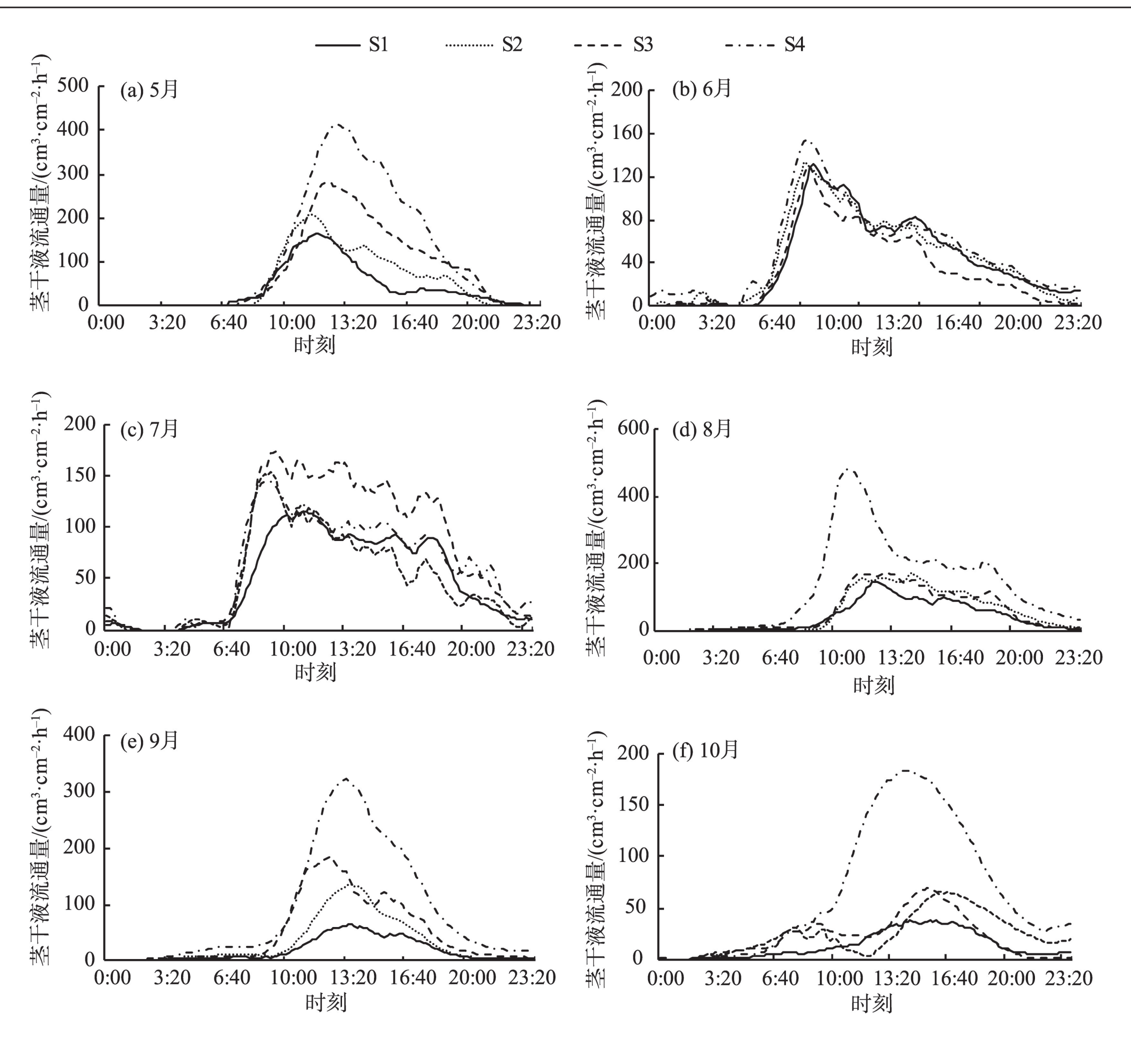


图2　不同基径下不同月份梭梭树茎干液流通量日变化

Fig. 2　Diurnal variation of stem sap flux of *Haloxylon ammodendron* under different basal diameters in different months

$cm^{-2}\cdot h^{-1}$之间，出现时间在11:20—12:50；6月、7月 *SV* 峰值分别在109.14~150.12 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$和117.89~174.25 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$之间，时间在9:00—10:30；9月 *SV* 峰值在67.95~308.98 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$，时间在12:50—13:20；10月 *SV* 峰值在36.75~181.04 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$，时间在14:30—16:40。7月4棵样树的 *SV* 呈现多峰型，一天内处于高流量状态时间较其他月份长。10月S2、S3样树 *SV* 呈多峰型。S4样树液流量较大且 *SV* 变化较其他3棵样树稳定，*SV* 整体趋势呈现为：S4>S3>S2>S1。

2.2.2　降雨对梭梭茎干液流日变化的影响　选择6月典型雨天（6月21日0:00—23:50）茎干液流通量 *SV*，结合降雨情况分析降雨对 *SV* 的影响（图3）。对照图2，雨天梭梭 *SV* 较晴天明显减小且茎流结束时间早，*SV* 变化不规律且呈多峰型，峰值在37.02~69.09 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$。4棵样树 *SV* 在13:00降雨量达到最大值0.6 mm后下降明显，*SV* 整体呈现为：S2>S3>S4>S1。

2.2.3　梭梭茎干液流通量的季节变化　对5—10月4棵样树 *SV* 日变化量取平均值来分析梭梭 *SV* 季节变化情况（图4）。5月 *SV* 保持上升趋势，并在5月22日达到峰值291.04 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$后开始降低；6月 *SV* 变化较大，最高值达202.88 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$，最小值为2.73 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$；7—9月保持波动稳定状态，波动范围在133.7 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$左右；10月后，*SV* 骤减，*SV* 波动范围在50 $cm^3\cdot cm^{-2}\cdot h^{-1}$左右。

2.2.4　梭梭生长季耗水量动态变化　不同直径梭梭各月份耗水量如图5所示，4棵样树总耗水量实测差异较大，S1~S4分别为227.04 kg、401.53 kg、453.57 kg、906.27 kg，各样树表现出直径越大，耗水量越多的变化规律，日均耗水量变化趋势差异性显著。其中，S1~S3样树相较S4耗水量差异尤其明显，S1、S2样树随着月份的增加，在生长季的耗水量表现为先升后降的趋势，S3、S4样树在5月后也表现出先升

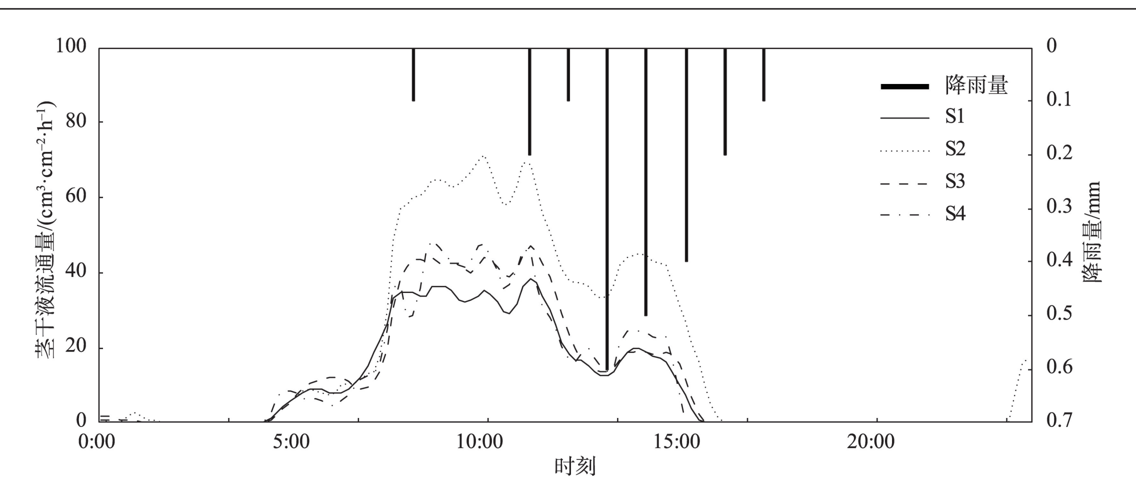


图3 雨天梭梭茎干液流通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of stem dry fluid flow rate of *Haloxylon ammodendron* on rainy days

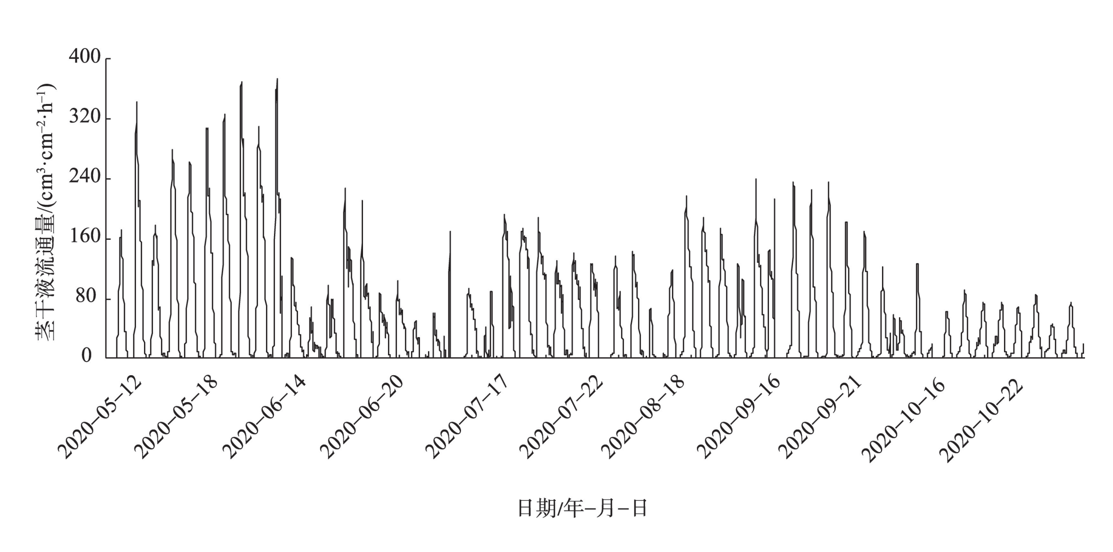


图4 4棵梭梭平均茎干液流通量季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of mean stem dry fluid fluxes of four *Haloxylon ammodendron* plants

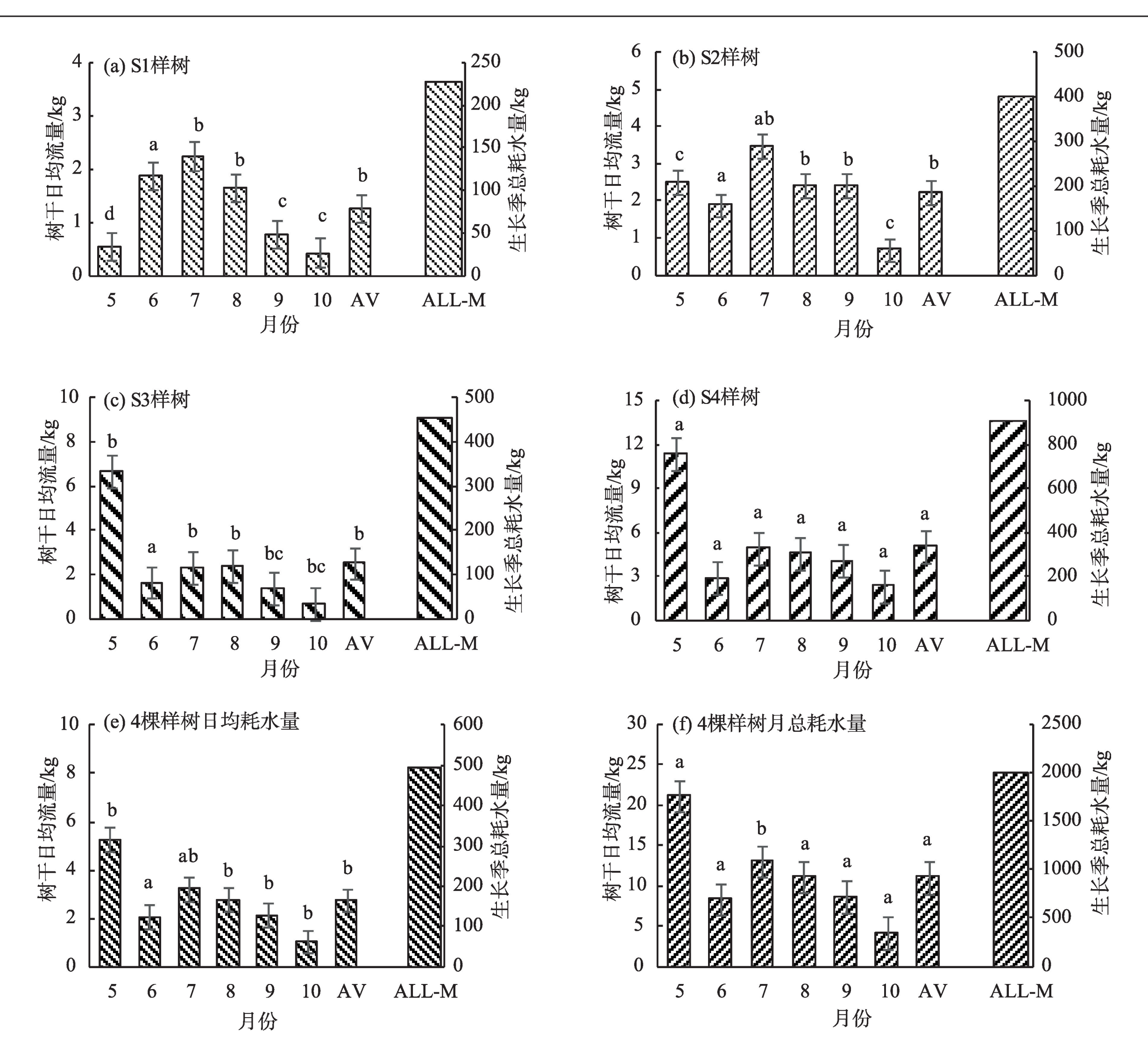
后降的趋势。5—10月4棵样树各月份日均耗水量分别为5.28 kg·d^{-1}、2.07 kg·d^{-1}、3.25 kg·d^{-1}、2.77 kg·d^{-1}、2.15 kg·d^{-1}、1.05 kg·d^{-1},观测期日均耗水量为2.76 kg·d^{-1}。月变化中,5月4棵梭梭的耗水量最高达到633.12 kg,占整个生长季总耗水量的31.84%。

2.3 梭梭液流与环境因子的相关性分析

2.3.1 梭梭液流与气象因子的相关性 2020年5月1日—10月30日,不同直径梭梭在各月份的*SV*与气象因子有着明显的相关性(表2),5月、10月*SV*与*Rn*相关性最高,6月与各气象因子不存在相关性,7月与*RH*相关性最高,8月与*VPD*相关性最高,9月与*T*相关性最高。对比各月份不同气象因子相关性系数,影响程度分别为:净辐射>气温>饱和水汽压差>相对湿度>风速。

*SV*在不同天气情况下都与各气象因子表现出相关性(表3),且晴天各梭梭*SV*与各气象因子的相关性明显高于雨天。晴天条件下,*VPD*是*SV*的主要影响因子,雨天影响梭梭*SV*环境因子和晴天有所差异,不同季节和不同梭梭之间,各影响因子的相关程度不同。在雨天中降雨量(Rain)与*SV*表现出极显著相关($P<0.01$),相关程度为:S4>S3>S2>S1。

2.3.2 梭梭液流与土壤水分的相关性 由表4可知,晴天条件下,梭梭*SV*与50~100 cm处的土壤水分(*VSW*)存在极显著的相关性。其中,50 cm处*VSW*与*SV*存在显著负相关,100 cm处*VSW*与*SV*存在显著正相关,且直径越大,相关性越显著。雨天条件下梭梭*SV*与*VSW*间不存在显著相关性。



注:不同小写字母表示各样树树干液流耗水量之间差异显著(P<0.05);AV表示5—10月日均耗水量;ALL-M表示耗水量实测值;S1,S2,S3,S4为样树编号。

图5 梭梭不同月份日均液流量及耗水量

Fig. 5 Daily and accumulation of sap flow of *Haloxylon ammodendron* in different months

3 讨论

3.1 梭梭茎干液流通量*SV*变化规律

5月*SV*启动时间晚,结束时间早(图2),且液流量处于整个观测期最大,这可能是由于5月温度变化幅度大,早晨7:00左右温度较低,随着温度的升高,光合有效辐射增强,茎流速率升高。青土湖年内较大风速期分布在4—6月[2],风速大会降低梭梭叶片的湿度,增大饱和水汽压差,从而影响茎流速率,这是导致5月茎干液流通量较大的直接原因。该结果与夏桂敏等[16]、刘朋飞等[17]研究苹果、沙枣树日变化结果一致。晴天情况下6—8月*SV*日变化曲线主要呈单峰型,峰值出现的时间较早,夜间液流微弱,昼夜差异显著,这可能是由于6—8月日照时间长,太阳辐射启动早、结束晚,午后高温造成梭梭同化枝气孔关闭,抑制枝叶蒸腾从而使茎流速率下降,该结果与李浩等[18]、黄雅茹等[19]、张晓艳等[13]等研究梭梭日变化结果相一致。9—10月*SV*有着明显降低,日变化中峰值出现时间推迟,这是由于9月、10月明显降温,梭梭自身代谢变的缓慢,对土壤水分的吸收和蒸腾量降低。7月*SV*日变化偶有多峰型,原因是整个观测期最高温出现在7月,在高温状态下为抑制水分散失,梭梭同化枝气孔关闭且代谢缓慢,使得整体茎流量较低且波动变化大。降雨前

表2 茎干液流与气象因子的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis between stem sap flow and meteorological factors at daily scale

直径/cm	月份	气温	相对湿度	净辐射	饱和水汽压差	风速
		T/℃	*RH*/%	*Rn*/(W·m^{-2})	*VPD*/kPa	*Ws*/(m·s^{-1})
S1=4.97	5	0.812**	−0.756**	0.858**	0.711**	0.577**
	6	−0.008	0.335	0.230	−0.126	0.465
	7	0.558**	−0.724*	0.512**	0.557**	0.491*
	8	0.465**	−0.202	0.357*	0.229	0.169*
	9	0.447**	−0.677**	0.591*	0.213	0.646**
	10	0.531*	−0.852**	0.724**	0.681**	0.704**
S2=5.23	5	0.801**	−0.711**	0.548**	0.644**	0.630**
	6	0.182	0.112	−0.180	0.557*	0.228
	7	0.458*	−0.727**	0.582**	0.582**	0.752**
	8	0.562**	−0.512**	0.441**	0.603**	0.571**
	9	0.656**	−0.585**	0.551*	0.629**	0.618**
	10	0.433*	−0.619**	−0.181	0.657**	0.633**
S3=5.69	5	0.811**	−0.332**	0.803**	0.712**	0.415**
	6	0.312	0.165	0.212	0.314	−0.256
	7	0.609**	−0.465**	0.644**	0.768**	0.580**
	8	0.516**	−0.471**	0.526**	0.571**	0.557**
	9	0.692**	−0.616**	0.575**	0.448*	0.605**
	10	0.525**	−0.428*	0.412	0.632**	0.457*
S4=7.40	5	0.551**	−0.609*	0.824**	0.653*	0.445*
	6	0.029	0.144	0.183	−0.124	0.064
	7	0.721**	−0.846**	0.651**	0.715**	0.622**
	8	0.754**	−0.610*	0.597**	0.773**	0.243
	9	0.844**	−0.313**	0.803**	0.736**	0.337**
	10	0.206	0.058	0.457**	0.150	0.078
平均直径	5	0.743**	−0.602**	0.758**	0.680**	0.516**
	6	0.128	0.189	0.112	−0.155	0.125
	7	0.586**	−0.691**	0.597**	0.655**	0.605**
	8	0.544**	−0.448**	0.480**	0.574**	0.385**
	9	0.659**	−0.547**	0.630**	0.506**	0.551**
	10	0.423*	−0.160	0.553**	0.430*	0.068

注:**表示极显著相关(P<0.01);*表示显著相关(P<0.05)。下同。

气温降低、相对湿度增高,蒸腾量变小;降雨来临时相对湿度达到当天最高,饱和水汽压差突降,梭梭*SV*变化不规律且明显低于晴天;随着降雨量的不断增大,梭梭茎流逐渐终止,该现象与孙慧珍等[20]、岳跃蒙等[21]、吴芳等[22]研究白桦、梭梭与刺槐茎干液流量的结果相一致。

3.2 梭梭耗水变化特征

梭梭的边材面积与直径存在指数函数关系,直径越大相同条件下茎流量越大[23-24],耗水量越高(图5),对气象因子的响应程度越高(表2)。4棵样树的耗水量在5月达到最高值(图5),其原因是梭梭枝条在4月开始萌发[25],5月降雨量较多,温度在5~25℃,光合有效辐射较强(图2),较为适宜的环境条件使梭梭枝条迅速发育,且较大的风速降低了叶片周围的相对湿度,促进了梭梭的蒸腾速率,从而使得5月梭梭的平均耗水量最大,该结果与曹晓明等[26]、张晓艳[27]、Yang等[28]在对梭梭耗水量季节变化的研究中得出的7月梭梭平均耗水量最大的研究结果不一致。降雨量在9月最高,而平均耗水量低,这是因为9月温度降低且梭梭体内脱落酸含量达到最高[25],脱落酸升高促使梭梭进入休眠状态[29-30],从而使梭梭耗水量较低。由表5[13,18-19,31-32]可知,相比古尔班通古特

表3　小时尺度茎干液流与气象因子相关分析

Tab. 3　Correlation analysis of hour-scale stem sap flow and meteorological factors

直径/cm	天气状况	气温 T/℃	相对湿度 RH/%	净辐射 Rn/(W·m^{-2})	饱和水汽压差 VPD/kPa	降雨量 Rain/mm
S1=4.97	晴天	0.765**	−0.714**	0.791**	0.769**	–
	雨天	0.376	−0.631**	0.850**	0.677**	0.470**
S2=5.23	晴天	0.762**	−0.712**	0.746**	0.772**	–
	雨天	0.392	−0.705**	0.752**	0.740**	0.488**
S3=5.69	晴天	0.816**	−0.771**	0.765**	0.787**	–
	雨天	0.450*	−0.584**	0.853**	0.737**	0.513**
S4=7.40	晴天	0.554**	−0.510*	0.671**	0.681**	–
	雨天	0.505*	−0.621**	0.878**	0.751**	0.546**
平均直径	晴天	0.714**	−0.665**	0.759**	0.771**	–
	雨天	0.436*	−0.658**	0.707**	0.740**	0.513**

注:降雨量数据为降雨的当天实时数据。

表4　茎干液流与土壤水分的相关性

Tab. 4　Correlation analysis between sap flow rate and soil moisture

土层/cm	晴天 S1	晴天 S2	晴天 S3	晴天 S4	雨天 S1	雨天 S2	雨天 S3	雨天 S4
5	0.009	−0.084	−0.161	0.178	0.211	0.224	0.203	0.197
20	−0.062	−0.155	−0.227	0.116	0.181	0.179	0.181	0.175
50	−0.760**	−0.781**	−0.722**	−0.837**	0.192	0.119	0.188	0.176
100	0.589**	0.621**	0.574**	0.689**	0.235	0.329	0.193	0.245

沙漠和乌兰布和沙漠生境下的梭梭,民勤青土湖梭梭与古尔班通古特沙漠相同基径下原生梭梭的耗水量相似,较同为人工梭梭的乌兰布和沙漠生境下的梭梭,相同基径下青土湖梭梭耗水量较少[19]。

3.3　环境因子对茎干液流通量的响应

不同的时间尺度下,梭梭*SV*对各气象因子的响应程度有着较大的差异(表2、表3)。5月梭梭处于生长季,在温度适宜降雨量充沛的情况下,*Rn*是影响*SV*最敏感的因子;6月*SV*与各气象因子的相关性不显著,原因是6月降雨量极少,土壤水分含量低(图6),干旱使得梭梭蒸腾作用减弱,这与孙鹏飞等[31]、董梅[33]、夏永辉等[34]研究发现在土壤水分胁迫条件下,*SV*与气象因子相关性不显著的结论一致;7月温度高且降雨多,*RH*制约了梭梭同化枝气

表5　不同地点梭梭耗水量比较

Tab. 5　Comparison of water consumption of *Haloxylon ammodendron* in different conditions

梭梭类型	监测时间/地点	测定方法	梭梭直径/cm	日耗水量/总耗水量/kg	文献
原生梭梭	4—9月/古尔班通古特沙漠	热脉冲法	7.8~9	2.5~4.6/400~500	[31]
原生梭梭	6—11月/巴丹吉林沙漠	热扩散法	9.9~13.66	2.0~8.3/495~1232	[13]
原生梭梭	5—9月/古尔班通古特沙漠	热扩散法	4.55~9.55	1.7~3.7/511~1145	[18]
人工梭梭	5—9月/乌兰布和沙漠	热扩散法	7~12.5	2.8~6.4/629~1104	[19]
人工梭梭	6—9月/石河子大学农试场	热扩散法	15.7~21.5	4.1~6.8/600~925	[32]

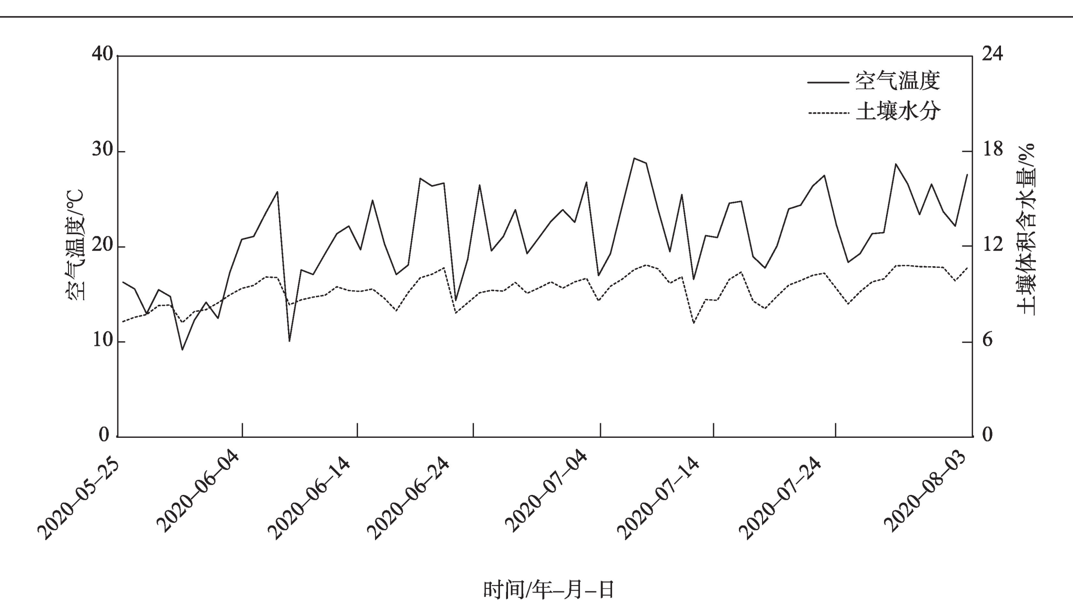


图6 土壤水分日变化

Fig. 6 Diurnal variation of soil moisture

孔开放;8月*VPD*是限制梭梭*SV*的主要因素;9月降雨频繁但温度降低,*T*是*SV*主要制约因子;10月在温度较低情况下*Rn*对梭梭*SV*影响最大;以上现象说明,梭梭*SV*对气象因子的响应复杂而多变。本研究的不足之处在于不同天气状况对梭梭*SV*影响的研究只做了晴天和雨天,未对阴天情况进行讨论。

晴天条件下,土壤水分含量与梭梭*SV*在50 cm与100 cm处表现出极显著相关,原因是观测地0~100 cm的土层为沙土,100 cm以下为干涸湖底,整体保水能力差,使得梭梭根系分布较深。50 cm处梭梭*SV*与*VSW*表现出极显著负相关,可能是由于50 cm以上的沙土在高温下参与地表蒸发,消耗梭梭根系周边的水分,抑制了梭梭的耗水;在100 cm处梭梭*SV*与*VSW*呈显著正相关,说明观测地100 cm以下的土层具备保水能力,梭梭的吸水根系大多分布在土层100 cm以下[28,35]。

4 结 论

(1)梭梭*SV*在5月达到最大值。晴天,6—8月茎干液流量的日变化曲线主要呈单峰型,7月偶有多峰型,峰值出现的时间较早,夜间液流微弱,昼夜差异显著。9—10月,*SV*明显降低,同时日变化中峰值出现时间推迟。雨天,梭梭*SV*明显低于晴天且茎流结束时间早。

(2)梭梭基径越大,耗水量越多。4棵梭梭日均耗水量2.15~5.28 kg·d^{-1},接近古尔班通古特沙漠原生梭梭5—9月日均耗水量2.8~6.4 kg·d^{-1}。

(3)梭梭*SV*对环境因子的响应在各月份表现出较大的差异性。日尺度下*SV*与气象因子的相关关系依次为:净辐射>气温>饱和水汽压差>相对湿度>风速,且基径越大,响应程度越显著。

(4)土壤水分对梭梭*SV*有很大影响。晴天土壤水分与梭梭*SV*呈极显著相关,且在土层100 cm以下的根区是影响梭梭*SV*的主要区域。

参考文献(References):

[1] 冯绳武. 民勤绿洲的水系演变[J]. 地理学报, 1963, 29(3): 241–249. [Feng Shengwu. The evolution of the Minqin oasis[J]. Acta Geographica Sinica, 1963, 29(3): 241–249.]

[2] 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 等. 石羊河流域下游青土湖近地层风尘分布特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1255–1262. [Guo Shujiang, Yang Zihui, Wang Duoze, et al. Dust distribution characteristics of Qingtu Lake surface layer at downstream Shiyang River [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1255–1262.]

[3] 柴成武, 王理德, 尉秋实, 等. 民勤青土湖区不同年限退耕地土壤水分和养分变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 101–105. [Chai Chengwu, Wang Lide, Wei Qiushi, et al. Soil moisture and nutrient changes in different years of abandoned farmlands in Qingtu district[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (5): 101–105.]

[4] 彭祥荣, 赵明瑞. 民勤县青土湖生态变化调查分析[J]. 现代农业科技, 2019(16): 167, 170. [Peng Xiangrong, Zhao Mingrui. Investigation and analysis on ecological change of Qingtu Lake in Minqin County[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019 (16): 167, 170.]

[5] 张华, 张玉红, 张改改. 民勤绿洲青土湖植被优势种地上生物量估算[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 201−210. [Zhang Hua, Zhang Yuhong, Zhang Gaigai. Aboveground biomass estimation of the dominant species of vegetation in the Qingtu Lake at Minqin Qasis [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 201−210.]

[6] 李易珺, 杨自辉, 郭树江, 等. 青土湖干涸湖底2种典型固沙植物群落土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 62−67. [Li Yijun, Yang Zihui, Guo Shujiang, et al. The relationship between fractal characteristics of soil particle size and soil nutrients of the soils of two typical sand-fixing plant communities at the bottom of the Qingtuhu Lake[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 62−67.]

[7] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 933−937. [Wang Anzhi, Pei Tiefan. Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 933−937.]

[8] Lagergren F, Lindroth A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2002, 112(2): 67−85.

[9] 常兆丰, 赵明, 刘虎俊, 等. 民勤荒漠生态退化动态特征研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 333−338. [Chang Zhaofeng, Zhao Ming, Liu Hujun, et al. Study on dynamic degenerate ecological characteristic of desertification in Minqin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11): 333−338.]

[10] 郭树江, 杨自辉, 王强强, 等. 青土湖干涸湖底风沙区植被特征与地表输沙量关系[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 19−24. [Guo Shujiang, Yang Zihui, Wang Qiangqiang, et al. Relationship between vegetation characteristics and sediment discharge transported by surface wind-sand flow in dry lake bottom sandstorm area of Qingtu Lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28 (1): 19−24.]

[11] 袁宏波, 刘淑娟, 安富博, 等. 生态输水对青土湖白刺灌丛沙堆土壤养分的影响[J]. 西部林业科学, 2019, 48(5): 1−6, 14. [Yuan Hongbo, Liu Shujuan, An Fubo, et al. Effects of ecological water transfer on soil nutrients in *Nitraria tangutorum* nebkhas in Qingtu Lake[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(5): 1−6, 14.]

[12] Granier A. Sap flow measurements in Douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method [water storage][J]. Annales des Sciences Forestieres (France), 1988, 44(1): 1−14.

[13] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*(C. A. Mey) Bunge)树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1525−1536. [Zhang Xiaoyan, Chu Jianmin, Meng Ping, et al. The effect of environmental factors on stem sap flow characteristics of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1525−1536.]

[14] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145−2151. [Ma Ling, Zhao Ping, Rao Xingquan, et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2145−2151.]

[15] Bedaiwy M N. A computer program for simultaneous calculation of reference and crop evapotranspiration by three methods[J]. Alexandria Journal of Agricultural Research, 2010, 55(1): 123−141.

[16] 夏桂敏, 孙媛媛, 王玮志, 等. '寒富'苹果树茎流特征及其对环境因子的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 701−714. [Xia Guimin, Sun Yuanyuan, Wang Weizhi, et al. The characteristics of sap flow of Hanfu apple trees and its response to environmental factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(4): 701−714.]

[17] 刘朋飞, 郭浩, 辛智鸣. 乌兰布和沙漠沙枣树干液流与环境因子关系[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 177−184. [Liu Pengfei, Guo Hao, Xin Zhiming. The relationship between the stem sap flow of *Elaeagnus angustifolia* Linn. and environmental factors in Ulan Buh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 177−184.]

[18] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7187−7196. [Li Hao, Hu Shunjun, Zhu Hai, et al. Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendron* by using thermal dissipation technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187−7196.]

[19] 黄雅茹, 辛智鸣, 李永华, 等. 乌兰布和沙漠人工梭梭茎干液流季节变化及其与气象因子的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 131−139. [Huang Yaru, Xin Zhiming, Li Yonghua, et al. Seasonal variation of the stem sap flow of artificial *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge and its relationship with meteorological factors in Ulan Buh Desert[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2020, 44(6): 131−139.]

[20] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1387−1391. [Sun Huizhen, Zhou Xiaofeng, Zhao Huixun. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(9): 1387−1391.]

[21] 岳跃蒙, 李晨华, 徐柱, 等. 古尔班通古特沙漠降雨过程中梭梭与白梭梭冠层养分的变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1293−1300. [Yue Yuemeng, Li Chenhua, Xu Zhu, et al. Variation characteristics of canopy nutrients during the rainfall process of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in the Gurbantunggut Desert[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1293−1300.]

[22] 吴芳, 陈云明, 于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J]. 植物生态学报, 2010, 34(4): 469−476. [Wu Fang, Chen Yunming, Yu Zhanhui. Growing season sap-flow dynamics of *Robinia pseudoacacia* plantation in the semi-arid region of Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(4): 469−476.]

[23] Wullschleger Stan D, King Anthony W. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees[J]. Tree Physiology, 2000, 20(8): 511−518.

[24] Stancioiu, Petru Tudor, O'Hara, Kevin L. Sapwood area-leaf area relationships for coast redwood[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(5): 1250−1255.

[25] 张文龙, 赵鹏, 朱淑娟, 等. 石羊河下游人工梭梭水分利用策略季节变化[J]. 草业科学, 2021, 38(5): 880−889. [Zhang Wenlong, Zhao Peng, Zhu Shujuan, et al. Research on seasonal water use strategy of artificial *Haloxylon ammodendron* in the lower reaches of the Shiyang River[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(5): 880−889.]

[26] 曹晓明, 陈曦, 王卷乐, 等. 古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 292−302. [Cao Xiaoming, Chen Xi, Wang Juanle, et al. Water consumption and transpiration of non-irrigated *Haloxylon ammodendron* in hinterland of Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 292−302.]

[27] 张晓艳. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭人工林蒸散研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016. [Zhang Xiaoyan. Evapotranspiration of *Haloxylon ammodendron* Plantation in Minqin Oasis-desert Ectone[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.]

[28] Yang W X, He X L, Yang G, et al. The study of native plants water consumption characteristic in Gurbantunggut Desert[J] Applied Mechanics and Materials, 2013, 295: 189−197.

[29] 李晖, 周宏飞. 稳定性同位素在干旱区生态水文过程中的应用特征及机理研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 810−816. [Li Hui, Zhou Hongfei. Application characteristics and mechanis of stable isotope techniques in the study of eco-hydrological prodresses in arid regions[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(6): 810−816.]

[30] 赵鹏, 徐先英, 屈建军, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1496−1505. [Zhao Peng, Xu Xianying, Qu Jianjun, et al. Relationships between artificial *Haloxylon ammodendron* communities and soil-water factors in Minqin oasis-desert ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1496−1505.]

[31] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6901−6909. [Sun Pengfei, Zhou Hongfei, Li Yan, et al. Trunk sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* growing in the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6901−6909.]

[32] 杨明杰, 杨广, 何新林, 等. 干旱区梭梭茎干液流特性及对土壤水分的响应[J]. 人民长江, 2018, 49(6): 33−38. [Yang Mingjie, Yang Guang, He Xinlin, et al. Stem sap flowing characteristics of *Haloxylon ammodendron* and its response to soil moisture in arid area[J]. Yangtze River, 2018, 49(6): 33−38.]

[33] 董梅. 柴达木地区主要树种抗旱耐盐生理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. [Dong Mei. Drought and Salinity Resistant Physiology of Main Tree Species in Qaidam of China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.]

[34] 夏永辉, 梁凤超, 师庆东, 等. 准噶尔西部人工碳汇林原生荒漠植被梭梭蒸腾耗水研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11755−11759. [Xia Yonghui, Liang Fengchao, Shi Qingdong, et al. The research of transpiration water-consumption on original *Haloxylon* desert vegetation around planted forest in arid region [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(33): 11755−11759.]

[35] 黄金廷, 侯光才, 尹立河, 等. 干旱半干旱区天然植被的地下水水文生态响应研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(5): 788−793. [Huang Jinting, Hou Guangcai, Yin Lihe, et al. Eco-hydrological response of natural vegetation in arid and semi-arid area: A review [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(5): 788−793.]

Characteristics of stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* and its response to environmental factors in Qingtu Lake, Minqin

QIANG Yuquan[1], XU Xianying[1,2], ZHANG Jinchun[2], LIU Hujun[2],
GUO Shujiang[2], DUAN Xiaofeng[2]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Gansu Institute of Desertification Control, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The daily and seasonal variation characteristics of stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* with different diameters from May to October in Qingtu Lake were monitored by a TDP plug-in plant stem flow meter. Combined with meteorological data, the water consumption characteristics of *Haloxylon ammodendron* and its response characteristics to environmental factors were investigated. The following results are presented. (1) The diurnal variation curve of stem sap flow from June to August was mainly a single peak, and occasional multipeaks were observed in July. The peak appeared early, that is, the night sap flow was weak, and the difference between day and night was significant. From September to October, the stem fluid flow (*SV*) decreased significantly, and the peak time in the daily variation was delayed. On rainy days, *Haloxylon ammodendron SV* decreased with the increase in rainfall. (2) The stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* was the largest in May, with a peak value of 291.04 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$. The *SV* of *Haloxylon ammodendron* increased first and then decreased from June to October and decreased sharply after reaching 225.73 $cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ in September. (3) A large base diameter of *Haloxylon ammodendron* induced increased water consumption. The total water consumption of four *Haloxylon ammodendron* is 1988.41 kg, and the daily average water consumption is 2.76 kg, which is close to the daily average water consumption of native *Haloxylon ammodendron* in Gurbantunggut Desert from May to September. (4) The response of stem fluid flow of *Haloxylon ammodendron* to environmental factors showed substantial differences each month. The correlation degree between *SV* and meteorological factors on a daily scale is as follows: air temperature > net radiation > saturated water air pressure difference > relative humidity > wind speed. (3) Soil moisture has a considerable influence on *Haloxylon ammodendron SV*. A significant correlation was observed between soil moisture and *Haloxylon ammodendron SV* on sunny days, and the main area affecting *Haloxylon ammodendron SV* was below 100 cm of the soil layer.

Keywords: *Haloxylon ammodendron*; meteorological factors; soil moisture; stem sap flow; Minqin